

УДК 621.7

МЕХАНИЗМ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ИНДУКЦИОННОМ НАГРЕВЕ

Г.А. ТКАЧЕНКО*(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Исследуется влияние циклического индукционного нагрева на процессы структурообразования углеродистых конструкционных сталей. Установлен ряд особенностей структурообразования при циклическом нагреве. В процессе циклической обработки на поверхности могут формироваться структуры вторичной рекристаллизации. После четырехкратной и более циклической обработке структура стали дефектна и склонна к рекристаллизации при отжиге. При рекристаллизационном отжиге происходит избирательный рост зерен за счет миграции границ. Полученные в структуре крупные рекристаллизованные зерна имеют прямые границы и оригинальную кристаллографическую ориентировку. Ровные границы указывают на то, что энергия границ минимальна и зерна находятся в равновесном состоянии. При продолжительном циклическом нагреве в тонком поверхностном слое возможна рекристаллизация наклепанных зерен, сопровождаемая вторичной рекристаллизацией и формированием зерен «гигантов».

Введение. Актуальной задачей современного металловедения является повышение комплекса механических свойств деталей, выполненных из углеродистых конструкционных сталей. Решение этой проблемы заключается в применении новых методов обработки наряду с уже существующими способами упрочнения сталей. К перспективным методам упрочнения можно отнести термоциклическую обработку (ТЦО) изделий. Под термоциклической обработкой следует понимать процесс термического воздействия, который осуществляется с заданной периодичностью теплосмен и определенной скоростью.

В силу специфики процессов, происходящих в условиях непрерывного изменения температуры, в сталях происходят изменения кинетики и механизмов структурообразования, а также меняются свойства сплава, а следовательно, надежность и долговечность изделий. Исследования и практический опыт показали эффективность использования метода ТЦО для повышения прочности, пластичности, вязкости и других эксплуатационных свойств стали. В ряде работ установлено положительное влияние циклического нагрева на диффузионные процессы во время химико-термической обработки.

В наших исследованиях удалось установить факт ускорения диффузии углерода и азота на стали 20, в процессе высокотемпературной нитроцементации из паст. В ходе непрерывного циклического нагрева, когда в результате перегрева образцов стали 20 на 200 °С выше точки A_3 , и охлаждения до температуры ниже точки A_1 на 100 °С, происходит интенсификация диффузионных процессов, т.е. измельчается микроструктура слоя и основного металла, а также увеличивается микротвердость. Кинетика диффузионного насыщения с циклическим нагревом имеет сложную зависимость от количества циклов за единицу времени. Также было установлено, что за один цикл, равный 2 мин, толщина высокоуглеродистого слоя составляет 280 мкм, а за четыре цикла продолжительностью по 30 с толщина слоя достигает 340 мкм. Помимо интенсификации процесса наблюдается значительное проникновение углерода вглубь основного металла. В сердцевине образцов при четырехкратном ТЦО феррит практически отсутствует. При увеличении частоты смены температурного режима до восьми циклов скорость роста слоя снижается, и толщина составляет всего 80 мкм. Это обусловлено тем, что при 8 циклах 15-секундной выдержки в высокотемпературной зоне при каждом цикле недостаточно для интенсивной диффузии углерода и азота вглубь материала.

Интенсификация процесса насыщения и формирование мелкозернистой структуры при ТЦО происходит за счет микродеформации зерен, которая возникает из-за термических и структурных напряжений, в результате чего происходит фазовый наклеп металла, который сопровождается рекристаллизацией [1]. Диффузия по движущимся границам зерен протекает быстрее, чем по неподвижным [2]. При деформации возрастает плотность дислокаций и вакансий в объеме зерен, при взаимодействии мигрирующих границ с дефектами происходит увеличение свободного объема границ, что способствует увеличению коэффициента зернограницной диффузии D_{gr} [3]. При высоких температурах, когда роль объемной диффузии существенна, движущиеся границы с высоким D_{gr} играют роль источников, из которых атомы углерода и азота диффундируют в объем зерен. Также ХТО совместно с циклическим нагревом приводит и к повышению микротвердости в диффузионном слое и сердцевине образцов. Повышение обусловлено тем, что при циклическом нагреве происходит уменьшение количества остаточного аустенита в слое [4].

Основными причинами ускорения диффузии атомов в металле при нестационарном процессе служат периодическая рекристаллизация наклепанных зерен и циклическое фазовое превращение, сопровождаемые измельчением структуры и увеличением протяженности границ зерен, тем самым формируя лучшие условия для протекания диффузионных процессов. Ранее ускорение диффузии наблюдалось при циклической пластической деформации (30 циклов нагружения), проводимой при статическом отжиге. В работе [5] установлено, что периодическая пластическая деформация приводит к генерированию дислокаций, развитию рекристаллизационных процессов и увеличению протяженности границ зерен. За счет этого удалось разогнать силицированный слой со 174 до 297 мкм. Стационарный процесс отжига увеличил слой лишь до 200 мкм. Таким образом, циклическая пластическая деформация является наиболее эффективным способом интенсификации диффузионных процессов, но требует выдержки в аустенитной области для придания энергии диффундирующим атомам.

Известно [1], что при ТЦО происходит фазовый наклеп, следовательно, возможно, что после окончания циклической обработки структура будет дефектна, т.е. сохранятся пластически деформированные зерна, которые могут повлиять на структуру стали в целом. В процессе авторских исследований обнаружен неизвестный ранее факт появления разнотермичности при индукционном ТЦО.

Образцы для экспериментов были предварительно отожжены при 1000 °С в течение 2 часов в защитной атмосфере. Длительным отжигом была получена крупнозернистая микроструктура феррита и перлита на стали 20, балл которой соответствовал 4...5, а сталь 40Х имела структуру, представляющую собой крупные колонии перлита, окруженные ферритными прослойками. Часть образцов была подвергнута циклической обработке по режимам, предусматривающим 1, 2, 4 и 6-ти кратную фазовую перекристаллизацию. Выбор кратности связан с определением эффективного числа циклов, обеспечивающего наименьший диаметр (балл) зерна. Использование небольшого шага циклической обработки требовалось для установления закономерностей, связанных с влиянием параметров циклического воздействия на материал, его кристаллическую решетку и напряжения, возникающие в структуре.

Режимы термоциклирования заключались в многократном переходе через критические точки на 50 °С выше и на 100 °С ниже точек A_3 и A_1 . Выбранный диапазон температур позволил получить равномерный нагрев всего сечения образца за один цикл индукционного нагрева. Дополнительно прогреву сечения образца способствует интенсивный теплоотвод с поверхности в сердцевину, что приводит к формированию мелкозернистого аустенита по всему сечению. Нагрев и охлаждение в циклах осуществляли с постоянной скоростью 30 и 3 °С/с. Температуру контролировали при помощи пирометра. За один цикл нагрева и охлаждения зерно стали 20 измельчилось до 7 баллов, а на стали 40Х была сформирована структура зернистостью 8 баллов. Дальнейшее термоциклирование позволило добиться размера зерна величиной до 11 баллов на стали 40Х, а на стали 20 не более 9 баллов. Процесс измельчения структуры наблюдался до четырех циклов. Дальнейшая фазовая перекристаллизация, вопреки ожиданиям, не привела к большему измельчению зерна, а наоборот, на стали 20 с поверхности образца проявилась разнотермичность (рис. 1). Такая микроструктура характерна для процессов, происходящих при рекристаллизации наклепанного материала. Известно, что процесс скоростного индукционного нагрева, а также процесс термоциклирования [1] сопровождаются фазовым наклепом матрицы, который проявляется увеличением количества дислокаций, плотность которых намного ниже, чем у закаленной стали. Также происходит образование и дробление блочной структуры зерен, что подтверждается уширением интерференционных линий рентгенограмм.

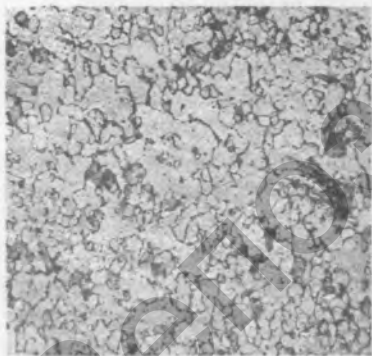


Рис. 1. Структура поверхности стали 20 после 6 циклов обработки, $\times 200$

По мнению авторов [1, 6, 7], фазовый наклеп происходит из-за наличия разности удельных объемов фаз при фазовом превращении $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$, которые служат мощным источником напряжений и, как следствие, приводят к деформации. Наличие термических напряжений, возникающих из-за градиента температур по сечению образца, разность коэффициента термического расширения фаз способствуют накоплению и релаксации напряжений. Микроструктура собирательной рекристаллизации проявилась только на поверхности образца, так как в тонком поверхностном слое напряжения скорее всего выше, чем в сердцевине. Это обусловлено тем, что поверхность находится в более жестких условиях циклического нагрева. Поверхность интенсивней нагревается за счет индукционных токов, а не за счет теплопроводности.

При охлаждении отвод тепла происходит легче и быстрее. Охлаждаясь, поверхностный слой, испытывает растягивающие напряжения, что также может способствовать процессу рекристаллизации. Известно [8], что растягивающие напряжения увеличивают коэффициент диффузии и самодиффузии.

Факт релаксации напряжений, связанный с фазовым наклепом, подтверждается расчетом по тензору напряжений. Полученное значение τ_{\max} (МПа) превышает условный предел текучести для стали 20: при температуре 800 °С $\tau_{\max} \approx \sigma_s / 2 \approx 35$ МПа [7]. Из этого следует, что при каждом термоцикле происходит релаксация напряжений, вызванных фазовым наклепом путем пластической деформации зерен и приграничных объемов (нижняя температура цикла).

В зависимости от температурного режима термоциклирования деформация может протекать по-разному. Известно, что при высоких температурах структурные и термические напряжения непрерывно релаксируют вследствие высокой подвижности границ. Снижение температуры термоциклирования может привести к значительным структурным и термическим напряжениям, релаксация которых происходит путем пластической деформации скольжением в менее прочном зерне, что связано с эффектом «термического зацепления» [7].

Установлено [6], что с увеличением скорости нагрева и охлаждения, повышается степень пластической деформации стальных образцов при ТЦО. Следовательно, процесс рекристаллизации в процессе циклической обработки с индукционным нагревом может происходить следующим образом. Недостаточная выдержка при верхней температуре цикла ведет к тому, что процесс рекристаллизации не успевает пройти полностью. К моменту достижения нижней температурной границы цикла в объеме металла происходит накопление дефектов кристаллического строения и возрастает доля наклепанных нерекристаллизованных зерен. Дополнительно к этому объему добавляются зерна, в которых при обратном превращении аустенита в феррито-перлитную смесь создаются напряжения, релаксация которых происходит в результате пластической деформации скольжением, возникающей из-за малой подвижности границ. Последующая ТЦО увеличивает количество нерекристаллизованных зерен, способствует накоплению фазовых напряжений и, как следствие, повышению степени деформации зерен. Как показал рентгено-спектральный анализ, при циклическом нагреве происходит уменьшение параметра решетки по плоскости [10]. Такое явление характерно для ситуации, когда из твердого раствора выделяется углерод, в момент 10-минутной выдержки, проводимой после горячей обработки давлением со степенью 40 %. По данным работы [9], параметр решетки уменьшается на 0,003 Å. При циклическом нагреве эта величина составляет 0,001 Å за 5 минут обработки (рис. 2).

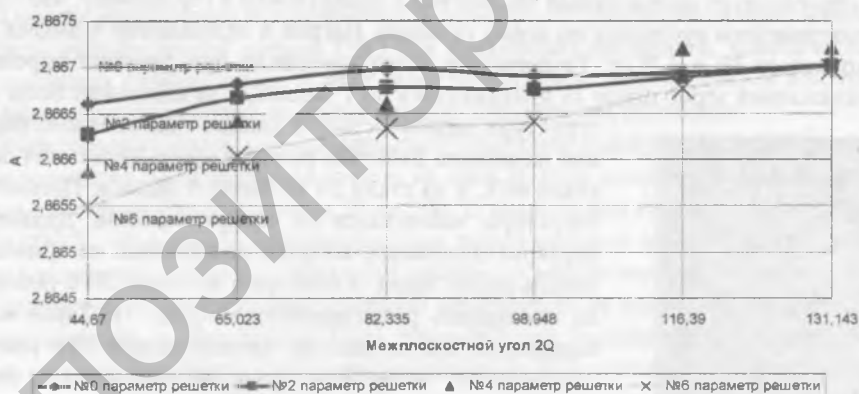


Рис. 2. Параметр решетки образцов после циклического нагрева:
0 – отжиг; 2 – 2 цикла; 4 – 4 цикла; 6 – 6 циклов

Таким образом, можно говорить о том, что зерна подвергаются пластической деформации, степень которой зависит от количества циклов. При многократной ТЦО (верхняя температура цикла постоянна) снижение температуры рекристаллизации [11] может привести не только к первичной, но и к вторичной рекристаллизации (скорее всего статической).

В структуре стали 20 после 4 циклов (см. рис. 1) на поверхности образца можно заметить укрупнение отдельных зерен феррита с микротвердостью 1600 МПа, а более мелкие, размером 10...16 мкм, с микротвердостью 1700 МПа. Микроструктура и микротвердость указывают на прошедший процесс частичной рекристаллизации. Дальнейшее термоциклирование приводит к большей разнотерности структуры феррита, где на фоне крупных зерен со средним диаметром 45...125 мкм присутствуют мелкие зерна, размер которых не превышает 10...16 мкм. При этом твердость мелких зерен увеличивается до 1780 МПа, а в крупных снижается до 1570 МПа.

Такой интенсивный рост зерен при вторичной рекристаллизации наблюдается при определенных степенях деформации. Известна так называемая критическая степень деформации 3...8 % [10]. В этом случае происходит рост зерен за счет слияния в одно крупное, путем «растворения» границ. Процесс

слияния зерен не требует значительных диффузионных процессов и, главное, слияние может происходить одновременно по всем поверхностям межзеренного раздела. На межзеренных границах происходит скопление дислокаций. Их аннигиляция, по сути, и есть «растворение» границ зерен. Для незавершенного процесса слияния характерно небольшое количество крупных зерен и большое количество мелких. Интенсивный рост зерен в слабо деформированной структуре наблюдается при быстром индукционном нагреве. Если процесс нагрева медленный, то процесс полигонизации успевает пройти и рост зерна, по механизму слияния, не происходит. Протекает обычный процесс рекристаллизации, который не приводит к такой разнотерности [10].

Предварительно обработанные циклическим нагревом образцы сталей 20 и 40Х подвергли рекристаллизационному отжигу. Режимы эксперимента были подобраны так, чтобы возможно было определить кинетику рекристаллизации зерен. Все образцы подвергали рекристаллизационному отжигу при температуре 850 °С в течение 60, 120 и 240 мин с последующим охлаждением на воздухе. Анализ полученных результатов позволил установить ряд особенностей, связанных со структурообразованием.

Начало рекристаллизации зафиксировано только после 4-часового отжига. В сердцевине образца (сталь 20) появляются крупные зерна ферритной фазы, которые имеют прямые границы и свою ориентировку. Крупная микроструктура наблюдалась не по всему сечению, а лишь на определенных участках (рис. 3).

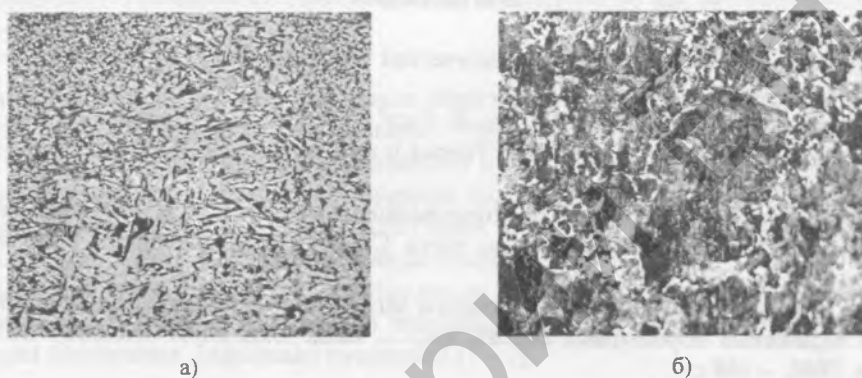


Рис. 3. Структура стали после предварительной ТЦО и 4-часового отжига, $\times 200$
а – сталь 20; б – сталь 40Х

Локальное развитие процесса укрупнения зерен, скорее всего, связано с неравномерной деформацией, а также распределением дислокаций. Задержка рекристаллизации связана с тем, что при циклическом нагреве происходит формирование и дробление блочной структуры. Помимо этого наблюдается полигонизация и так называемая «рекристаллизация на месте», когда происходит рост субзерен.

Известно [9], что процесс «рекристаллизации на месте» не устраняет дефектности кристаллической решетки и свойства металла не возвращаются к исходным параметрам, поэтому микротвердость нерекристаллизованных зерен должна сохраниться. Измерения микротвердости образцов после отжига показали устойчивость микроструктуры и отсутствие рекристаллизационных процессов. Микротвердость зерен на протяжении 4 часов находилась в пределах 1500...1610 МПа, что сопоставимо с твердостью после ТЦО. Четырехчасовой отжиг привел к разнотерности с крупными зернами феррита с твердостью 1270 МПа, что характерно для отожженного образца (сталь 20). По мере удаления от крупнозернистых участков твердость повышается до значений 1450...1610 МПа.

Устойчивость полигонизованной структуры достигается благодаря образованию вертикальных стенок дислокаций, обладающих низкой энергией. Тогда полигонизованная структура оказывается настолько устойчивой, что в ряде случаев стенки обнаруживаются в наклепанном металле даже после нагрева до температуры выше рекристаллизации. В однородно деформированном железе устойчивые вертикальные стенки дислокаций внутри зерна наблюдаются в ряде случаев при нагреве до температур фазового превращения, а в стали, когда субграницы декорируются трудно растворимыми и дисперсными карбидами, субграницы сохраняются и после фазовой перекристаллизации. Образовавшиеся таким образом субграницы обладают малой энергией и малой подвижностью, что приводит к отсутствию стимула изменения структуры – полигонизация как бы конкурирует с рекристаллизацией, уменьшая интенсивность ее развития [9]. О прохождении процесса «рекристаллизации на месте» может свидетельствовать увеличение размеров кристаллитов до 400 нм, в образцах стали 20 после 6 циклов нагрева и охлаждения. Отожженный образец имеет размер кристаллитов всего 200 нм. Дополнительным фактором, сдерживающим процесс миграции границ и рекристаллизацию, является температура процесса (850 °С), при которой происходит неполная аустенизация структуры стали 20.

На образцах стали 40Х формирование зерен вторичной рекристаллизации замечено после одночасовой выдержки. Этот факт может указывать на то, что степень деформации зерен выше и, следовательно, температура рекристаллизации ниже. Поэтому процессы развиваются стремительнее, чем на стали 20 (см. рис. 3). Этот процесс охватывал больше зерен с каждым часом отжига, что привело к гигантскому размеру зерен перлита, размер которых достигал 1,5 мм. Характерной особенностью для всех микроструктур является то, что крупные зерна присутствуют на фоне мелких, диаметр которых не более 0,019 мм.

Заключение. Установлено, что индукционная циклическая термообработка от четырех циклов и более приводит к значительному измельчению структуры до 9...11 баллов. Однако структура обладает повышенной дефектностью и предрасположена к развитию вторичной рекристаллизации.

При рекристаллизационном отжиге происходит избирательный рост зерен, за счет миграции границ. Полученные в структуре крупные рекристаллизованные зерна имеют прямые границы и оригинальную кристаллографическую ориентировку. Ровные границы указывают на то, что энергия границ минимальна и зерна находятся в равновесном состоянии. При продолжительном циклическом нагреве в тонком поверхностном слое возможна рекристаллизация наклепанных зерен, сопровождаемая вторичной рекристаллизацией и формированием зерен «гигантов».

ЛИТЕРАТУРА

1. Метод термоциклической обработки металлических материалов / В.К. Федюкин. – Л.: «Знание», 1979. – 24 с.
2. Диффузия по границам зерен и фаз / И. Каур, В. Густ. – М.: «Машиностроение», 1991. – 448 с.
3. Неравновесные границы зерен в металлах. Теория и приложения / В.Н. Чувильдеев. – М.: «Физматлит», 2004. – 304 с.
4. Ткаченко, Г.А. Разработка технологии электрохимико-термической обработки крепежных элементов плугов / Г.А. Ткаченко // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Промышленность. Прикладные науки. – 2009. – № 8. – С. 32 – 37.
5. Штемпель, О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защиты покрытий в подвижных порошковых смесях: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / О.П. Штемпель. – Новополоцк, 2003. – 166 с.
6. Забелин, С.Ф. Основы технологии и кинетической теории процессов диффузионного насыщения сталей в условиях термоциклического воздействия на материал: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / С.Ф. Забелин. – Чита, 2004. – 254 с.
7. Справочник по термомеханической и термоциклической обработке металлов / М.Е. Смагоринский. – СПб., 1992. – 392 с.
8. Власов, Н.М. Диффузия примесей внедрения через цилиндрическую оболочку с остаточными напряжениями / Н.М. Власов, И.И. Федик // ДАН. – 2002. – Т. 384, № 3. – С. 324 – 327.
9. Бернштейн, М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: «Металлургия», 1977. – 430 с.
10. Гуляев, А.П. Металловедение / А.П. Гуляев. – 5-е изд. – М.: «Металлургия», 1977.
11. Новиков, И.И. Теория термической обработки металлов / И.И. Новиков. – М.: «Металлургия», 1978. – 391 с.

Поступила 03.06.2010

THE MECHANISM OF STRUCTURIZATION OF CARBON STEELS UNDER CYCLIC INDUCTIVE HEATING

G. TKACHENKO

A number of features of structurization is established at cyclic heating. In the course of cyclic processing, on a surface, structures secondary recrystallization can be formed. After four and more multiple cyclic processing the steel structure is defective and inclined to recrystallization at annealing.